

# 劣质水灌溉对土壤盐碱化及作物产量的影响

李法虎<sup>1</sup>, M. Benhur<sup>2</sup>, R. Keren<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学; 2 以色列土壤、水和环境科学研究所)

**摘要:** 长期的劣质水灌溉将导致土壤潜在的次生盐碱化。通过在以色列的大田试验, 分析了劣质水灌溉对浅埋地下水位条件下土壤盐碱动态和作物产量的影响。试验在安装有暗管排水系统的试验田中进行。试验田土壤为粉砂粘土, 种植有饲料玉米(*Zea mays* L.)。试验结果显示, 高盐碱地下水的侧向运动和蒸发形成了试验田南半部和北半部土壤中盐碱度分布的巨大差异。在试验条件下, 0~1.2 m 土壤中的盐分在整个玉米生长期平均增加了 7.5%, 碱度增大了 19.6%。作物产量和植株高度与土壤含盐量成反比, 籽粒产量受影响最为严重。利用冬季的降雨淋洗土壤盐分是维持本地区灌溉农业持续发展的关键。

**关键词:** 劣质水灌溉; 土壤盐碱化; 作物产量; 地下水位

**中图分类号:** S273.5; S156.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2003)01-0063-04

## 1 引言

以色列位于亚、非、欧三大大陆的交界处, 属于干旱半干旱的地中海气候。试验区多年平均降水量为 500 mm。10 月份至来年 3 月份为雨季, 降雨主要集中在 11、12 和 1 月份的 3 个月内; 4 月份至 9 月份为旱季, 是作物的主要生长季节, 但此间完全没有降雨。因此没有灌溉就没有本地区的农业发展。

由于淡水资源的短缺和工业用水的竞争, 农业生产对劣质水(咸水或城市污水)应用的依赖性日益增加。劣质水灌溉不仅给农作物生长提供了所需的水分, 而且也能淋洗掉作物根系层中的部分盐分, 因此有利于作物生长。但长期的灌溉增加了土壤和地下水中的盐分<sup>[1]</sup>, 不仅导致了土壤的次生盐碱化从而降低作物产量, 而且也将恶化农业生态环境, 阻碍农业生产的持续发展。

盐分在土壤中的累积速度取决于淋洗水量(降雨和灌溉)和水质、地下水位、土壤质地、水文地质条件、气象条件以及管理水平等诸多因素。在干旱半干旱地区, 强烈的大气蒸发和作物蒸腾促使地下水中的盐分向上运移, 从而引起土壤中盐分的累积。

以色列海法附近的伊泽尔(Yizre'el)河谷, 是以色列的主要农业生产区。但该地区的水文地质条件引起的排水问题一直困扰着本地区的农业生产。特别是近年来的劣质水灌溉已使本地区的土壤盐碱化程度日益加重, 严重地影响了农业生产的发展。为了抑制土壤的次生盐碱化, 当地农民采取地下暗管排水和适当增加灌水定额的方法, 试图保持有效灌溉农业的持续发展。本文将对这一措施的有效性进行大田实验研究。

许多学者已对浅埋地下水位条件下的土壤水盐动态和作物产量进行了较为详细的研究<sup>[2,3]</sup>, 但对侧向潜流情况下的土壤盐碱运移动态的研究相对较少<sup>[4]</sup>。地表水、土

壤水和地下水是一个有机的整体。在浅埋地下水位条件下, 土壤水和地下水相互转化并相互影响, 因此当我们研究土壤盐碱度的变化时, 必须同时考虑地下水运动状况对土壤盐碱运动的影响。由于弱透水层和地下水水力坡降的存在<sup>[5]</sup>, 本试验区在地表到地下 6 m 的深度之间形成侧向潜流。

本试验的主要目的是研究劣质水灌溉对浅埋地下水位条件下的土壤盐碱动态平衡的影响以及对作物产量的影响。

## 2 试验方法和试验布置

试验田位于伊泽尔河谷的西部, 地势北高南低, 其坡度大约为 1%。土壤质地为粉砂粘土(Grumosol), 其中粘粒含量 530 g/kg, 粉粒含量 380 g/kg, 砂粒含量 90 g/kg。土壤 CaCO<sub>3</sub> 含量为 66 g/kg, 有机质含量为 39 g/kg。土壤中的粘粒部分主要为蒙脱石。土壤的阳离子交换量为 54 cmol/kg。

试验田暗管排水系统的管径为 0.25 m, 管长大约为 200 m。管距从北到南分别为 31、31 和 28 m。中间两管道埋深为 0.8 m, 外侧两根管道的埋深为 1.8 m。地下水位由观测管测定, 观测管埋设深度为 1.5 m。地下水位每两周观测一次。地下水水质由沿试验田横剖面线布置的五组陶瓷杯溶液提取器监测。提取器的埋置深度为 1.8 m。水样每周取一次, 测定水样的电导率(EC)和 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 等浓度, 计算其钠吸附比(SAR)。暗管排水系统和试验布置示意图见图 1。

1999 年试验田春耕后, 3 月中旬播种饲料玉米(*Zea mays* L.), 播种密度大约为 60 000 株/hm<sup>2</sup>。灌溉采用一套线性移动式喷灌系统进行。灌溉水是经处理后的城市污水, 主要为氯盐。其 EC 为 2.5 dS/m, SAR 为 6 (mmol·L<sup>-1</sup>)<sup>1/2</sup>。灌溉开始于 5 月初, 灌溉定额为 308 mm。肥料 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 通过灌溉水使用, 使用量为 200 kg/hm<sup>2</sup>。玉米在 7 月中旬收获。

沿试验田横剖面线(从北向南)分别在玉米生长初期(3 月中旬)和收获后(7 月中旬)进行两次土壤取样。取样

收稿日期: 2002-07-23 修订日期: 2002-11-27

作者简介: 李法虎(1963-), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程和水土环境的研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院 295 信箱, 100083



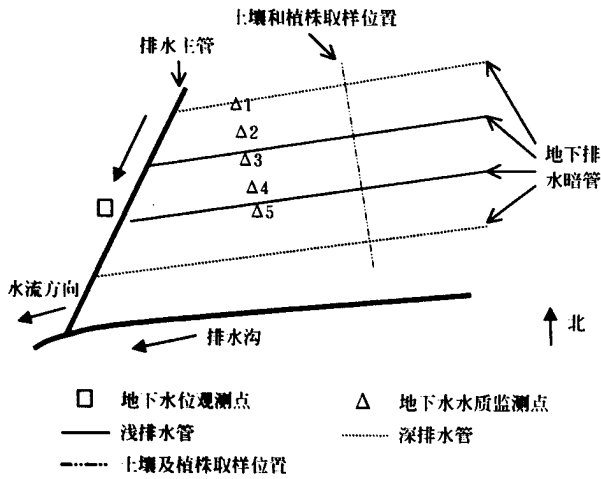


图1 暗管排水系统和实验布置

Fig 1 Layout of drainage pipe system and experiment design

剖面线长 125 m, 取样间距为 5 m, 取样深度为 0~0.3, 0.3~0.6, 0.6~0.9, 0.9~1.2 m。测定土壤样本的含水率以及土壤饱和泥浆浸提液的 EC, 对浸提液进行化学分析并计算其 SAR 值。化学分析项目同上。

土壤溶液的 EC 值由电导测定仪 (TH-2400E1-Hamma) 测定, Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 浓度由原子吸收光谱仪 (Perkin-Elmer 460) 测定, Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup> 浓度由火焰光度计 (Corning 400) 测定, Cl<sup>-</sup> 浓度利用自动数字型氯测定仪 (Haake Buchler) 测定。

在玉米生长旺盛期, 分别进行两次 (5 月初和 5 月底) 植株高度取样。每个取样点选定 3 垄, 每垄 5 株作物。在玉米收获前, 对玉米产量进行取样分析, 采集的植株样本数与作物高度取样时的相同。玉米植株从地表处砍断, 对作物茎秆和果实分开称重。将植株样本在 60℃ 烘箱中烘烤 2 d 后, 再分别确定它们的干质量。玉米高度和产量取样时的位置与土壤取样时的位置相同。

### 3 试验结果和讨论

在玉米生长期 (3~7 月份), 地下水位从 0.7 m 连续下降至 1.2 m (图 2), 灌溉并未引起地下水位的回升。

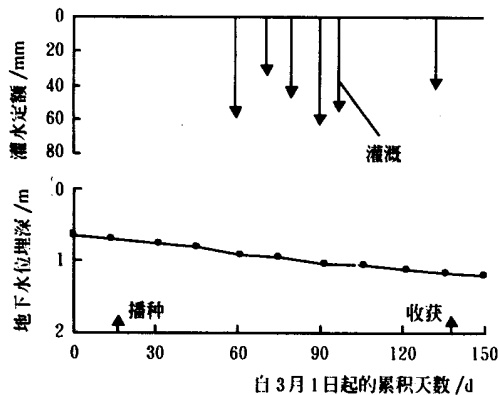


图2 玉米生长期内灌溉时间、灌水定额以及地下水位变化

Fig 2 Irrigation time and amount, and groundwater table during corn growth season

实测数据显示, 土壤含水率随土壤取样位置的变化较小。浅层土壤 (0~0.6 m) 的平均质量含水率 (0.20 kg/kg) 稍微小于深层土壤 (0.6~1.2 m) 的含水率 (0.22 kg/kg), 但二者都远小于土壤的田间持水量 (0.34 kg/kg)。土壤的强烈蒸发是其主要原因。

大量的文献资料表明<sup>[6,7]</sup>, 在浅埋地下水位情况下大约蒸发量的 25%~70% 来源于地下水。土壤毛细作用使得浅埋的地下水源源不断地向上运动, 从而保持了土壤水分时空分布的相对均匀性。

在玉米生长初期和末期两个不同深度 (0~0.6 m 和 0.6~1.2 m) 土壤的饱和泥浆浸提液的电导率沿试验田横剖面线的分布见图 3。总的来讲, 沿着土壤取样剖面线, 距土壤取样起始点 (从北向南) 越远, 土壤含盐量越大, 即地势越高土壤含盐量越小, 反之越大。深层土壤含盐量沿取样距离的变化大于浅层土壤含盐量的变化。

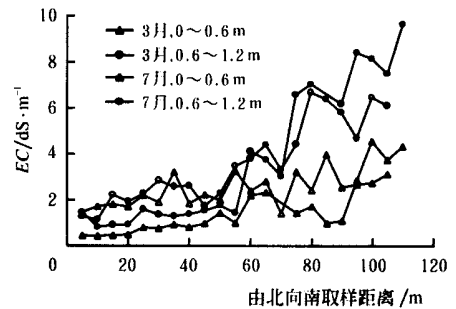


图3 在玉米生长初期和末期 2 个不同土层 (0~0.6 m 和 0.6~1.2 m) 土壤的饱和泥浆浸提液的电导率 (EC) 沿田间横剖面线的分布

Fig 3 Distribution of electrical conductivity (EC) of soil saturated paste extracts in different layers (0~0.6 m and 0.6~1.2 m) at the sowing and harvesting seasons of corn along the transverse profile

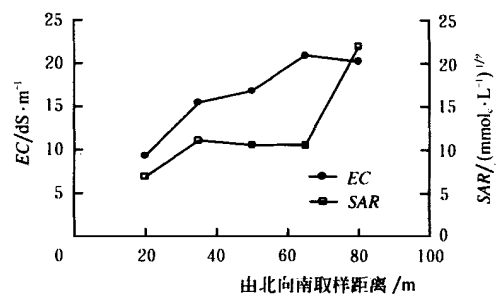


图4 地下水的 EC 和 SAR (3 月中旬) 沿取样距离的变化

Fig 4 EC and SAR of groundwater in March versus the transverse profile

地下水的侧向运动使得地下水中的盐分由北向南增加 (图 4)。强烈的蒸发作用引起地下水中的盐分上移, 从而导致土壤含盐量随土壤取样距离的增大而增加。

试验田土壤含盐量沿取样剖面线的分布可近似地分为两部分: 北半部的低盐区和南南部的高盐区, 其分界线在整块试验田的中部即在取样距离大约为 60 m 的附近。由于冬季降雨的淋洗, 浅层土壤的含盐量在春季时明显地小于深层土壤的含盐量 (图 3)。而在秋季时, 作物长期内的灌溉带入土壤中的盐分以及蒸发引起的地下水

中盐分上移导致试验田北半部土壤中的含盐量明显地大于玉米播种初期的土壤含盐量, 并且土壤含盐量在整个土壤剖面内几乎相同。然而, 由于作物生长期内地下水位的下降(图 2)减少了潜水蒸发引起的盐分上移以及灌溉水的淋洗作用, 试验田南半部的浅层土壤中的含盐量与春季时的含盐量相比变化不大, 而深层土壤含盐量比春季时有所减小。

在玉米生长的初期和末期, 试验田北半部(0~ 60 m)和南半部土壤(60~ 120 m)的饱和泥浆浸提液的平均电导率沿土壤深度的变化见图 5。由图 5 可以看出, 经过 4 个月的作物生长后, 盐分在北半部土壤中的增加大于在南半部的减少。据计算<sup>[8]</sup>, 0~ 1.2 m 土壤中的盐分在作物生长初期和末期分别为  $8.43 \times 10^5$  和  $9.05 \times 10^5$  mol/L/hm<sup>2</sup>, 即 7 月份的土壤盐分比 3 月份的增加了 7.5% 左右。虽然在作物生长期内有大约 300 mm 的灌溉水被用来补充土壤水分和淋洗土壤盐分, 但灌溉水带入土壤中的盐分和由潜水蒸发引起的地下水中盐分的向上运动仍使 0~ 1.2 m 土壤剖面中的盐分呈增加趋势。因此, 利用冬季降雨淋洗盐分是维持土壤中盐分年际间平衡的关键。

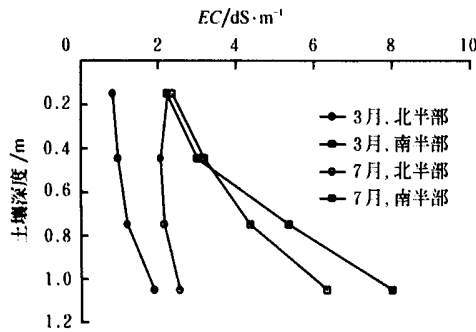


图 5 在玉米生长初期和末期试验田北半部(0~ 60 m)和南半部(60~ 120 m)土壤的饱和泥浆浸提液的平均电导率(EC)随土壤深度的变化

Fig 5 Average electrical conductivity (EC) of soil saturated paste extracts in north part (0~ 60 m) and south part (60~ 120 m) of the experiment plot at the sowing and harvesting seasons of corn versus soil depth

土壤中增加的盐分主要有两个来源: 灌溉水携带的盐分和潜水蒸发引起的地下水中盐分的上移。在整个作物生长季节内, 灌溉水带给土壤的盐分为  $7.7 \times 10^4$  mol/L/hm<sup>2</sup>。根据盐分平衡计算, 在作物生长期内大约有  $1.5 \times 10^4$  mol/L/hm<sup>2</sup> 的盐分由于灌溉水淋洗作用而从 0~ 1.2 m 土壤剖面中移走。因此, 利用劣质水灌溉不仅可有效抑制地下水中的盐分向上运动, 而且可淋洗掉土壤中的部分盐分。

在玉米生长初期和末期两个不同深度(0~ 0.6 m 和 0.6~ 1.2 m)土壤的饱和泥浆浸提液的钠吸附比沿试验田横剖面线的分布见图 6。在雨季末期(3 月份), 试验田北半部浅层和深层土壤的 SAR 值相差不大, 但试验田南半部深层土壤的 SAR 值比浅层土壤的 SAR 值大很多。而在 7 月份, 整块试验田深层土壤的 SAR 值显著地大于

浅层土壤的 SAR 值。这些结果显示, 土壤的碱度受灌溉水质和地下水质的共同影响。浅层土壤的 SAR 值主要受灌溉水的 SAR 值的影响, 而深层土壤的 SAR 值主要由地下水的 SAR 值所决定(图 4)。在玉米的整个生长期内, 土壤剖面(0~ 1.2 m)上的 SAR 值平均增加了 19.6%。

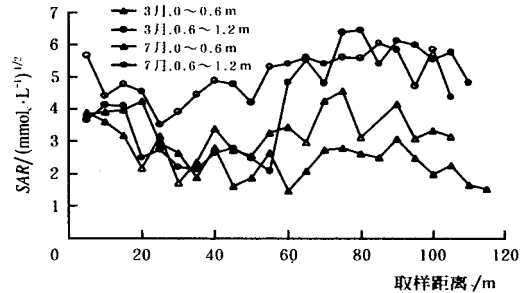


图 6 在玉米生长初期和末期两个不同深度土层(0~ 0.6 m 和 0.6~ 1.2 m)土壤的饱和泥浆浸提液的钠吸附比(SAR)沿试验田横剖面线的分布  
Fig 6 Distribution of sodium absorption ratio (SAR) of soil saturated paste extracts at two soil depths (0~ 0.6 m and 0.6~ 1.2 m) at the sowing and harvesting seasons of corn along the transverse profile

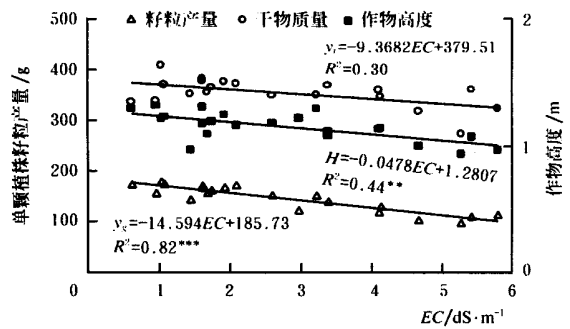


图 7 植株高度(H, 5月下旬)、单棵植株干物质重(y<sub>d</sub>)和籽粒产量(y<sub>g</sub>)与作物生长期土壤剖面平均电导率(EC)的关系

Fig 7 Plant height (H, the end of May), dry matter weight (y<sub>d</sub>) and grain yield (y<sub>g</sub>) per plant against the average EC of saturated paste extracts on soil profile during plant growth period

试验结果显示, 作物产量和植株高度随着取样距离的增加而不同程度的减小。单棵植株的籽粒产量和干物质重以及植株高度随土壤电导率的增加而近似线性地减小(图 7)。籽粒产量受土壤盐碱化的影响程度最大, 植株高度次之, 干物质总重受影响最小。这一观测结果与 Carter 的结论一致<sup>[8]</sup>。因此, 在盐碱土壤上更适宜于种植饲料作物。

#### 4 结论

土壤次生盐碱化是一个相当复杂的过程, 浅埋地下水的运动状况对土壤盐碱动态平衡和时空分布有极大的影响。弱透水层的存在导致土壤较低的盐分垂直淋洗效果, 地下水的强烈腾发作用导致了实验田土壤中盐分和可交换钠的累积。浅地下水位是形成土壤次生盐碱化的主要原因。在试验条件下, 作物生长期内 0~ 1.2 m 土壤

中的盐分平均增加了 7.5%，碱度增大了 19.6%。作物产量和植株高度与土壤含盐量成反比。作物籽粒产量受土壤含盐量危害的程度最大，而干物质质量所受的影响最小。利用冬季的降雨淋洗土壤盐分是维持本地区有效灌溉农业持续发展的关键。

#### [参 考 文 献]

- [1] Suarez D L. Impact of agricultural practices on groundwater salinity [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1989, 26: 215~ 227.
- [2] Moreno F, Cabrera F, Andreu L, et al. Water movement and salt leaching in drained and irrigated marsh soils of southwest Spain [J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 27: 25~ 44.
- [3] Gavazza L, Rossi Pisa P. Effect of watertable depth and waterlogging on crop yield [J]. *Agricultural Water Management*, 1988, 14: 29~ 34.
- [4] 刘世春, 南鸿飞. 古黄河背河洼地浅层地下水动态和井灌井排改良盐渍土[A]. 国际盐渍土改良学术讨论会论文集[C]. 1985, 352~ 358.
- [5] Shalit G, Shavit U, Nedan S, et al. The effect of shallow artesian pressure on salinity in a summer irrigated inland valley [A]. In Brown L C (ed.) *Drainage in 21<sup>st</sup> century: food production and the environment* [C]. Proceeding of Annual Drainage Symposium 7<sup>th</sup>, Orlando, ASA E, M I, U SA, 1998, 116~ 122.
- [6] Kruse E G, Champion D F, Cuevas D L, et al. Crop water use from shallow, saline water table [J], *Trans of the ASA E*, 1993, 36: 697~ 707.
- [7] Wallender W W, Grimes D W, Henderson D W, et al. Estimating the contribution of a perched water table to the seasonal evapotranspiration of cotton [J]. *Agronomy J*. 1979, 71: 1056~ 1060.
- [8] Bresler E, McNeal B L, Carter D L. *Saline and sodic soils: principles-dynamics-modeling* [M]. Springer-Verlag, Berlin, 1982.

## Effect of marginal water irrigation on soil salinity, sodicity and crop yield

Li Fahu<sup>1</sup>, M. Benhur<sup>2</sup>, R. Keren<sup>2</sup>

(1. *College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;*

2. *Institute of Soil, Water and Environmental Sciences, Tel Aviv 50250, Israel*)

**Abstract** Irrigation with marginal water for an extended period of time will result in potential secondary soil salinization and sodification. The influence of marginal water irrigation on the dynamic balance of soil salinity and sodicity, as well as crop yield under shallow groundwater table, was investigated. This experiment was conducted in a subsurface-drained plot with silt clay soil where forage corn (*Zeamays*L.) had been planted. The experimental results indicated that the lateral movement of saline and sodic groundwater and its evaporation resulted in a significant difference of salt and sodicity distribution between the north and south parts of the experimental plot. Under the experimental conditions, the salt in 0~ 1.2 m soil increased by an average of 7.5% and sodicity by 19.6% during the corn growth season. Plant yield and height inversely correlated with soil salinity. Among grain yield, dry matter weight and plant height, the grain yield was most negatively affected by soil salinity. Therefore, utilizing rainfall in winter to leach soil salt is necessary to maintain sustainable irrigation agriculture in this region.

**Key words** marginal water irrigation; soil secondary salinization and sodicilization; crop yield; groundwater table